Interreg CENTRAL EUROPE
European Union
European Regional Development Fund

RAINMAN

PILOTSTUDIE OBERÖSTERREICH

MODELLIERUNG VON STARKREGEN-OBERFLÄCHENABFLUSS/HANGWASSER

LEITFADEN

Stefan Achleitner[1], Andreas Huber[1], Simon Lumassegger[1], Bernhard Kohl[2], Yvonne Spira[3], Felix Weingraber[4]

[1)] Universität Innsbruck AB Wasserbau, [2)] Institut für Naturgefahren, BFW - Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, [3)] Umweltbundesamt, [4)] Land Oberösterreich Gruppe Schutzwasserwirtschaft

universität innsbruck
Arbeitsbereich für Wasserbau

LAND OBERÖSTERREICH

ENVIRONMENT AGENCY AUSTRIA umweltbundesamt

Bundesministerium
Landwirtschaft, Regionen und Tourismus

Our Project is funded by the Interreg CENTRAL EUROPE Programme that encourages cooperation on shared challenges in central Europe and is supported under the European Regional Development Fund.

Pilotstudie Oberösterreich

Modellierung von Starkregen-Oberflächenabfluss/Hangwasser

Leitfaden

Version 1	19.06.2020
Autoren	Stefan Achleitner[1], Andreas Huber[1], Simon Lumassegger[1], Bernhard Kohl[2], Yvonne Spira[3], Felix Weingraber[4]
	[1)] Universität Innsbruck AB Wasserbau, [2)] Institut für Naturgefahren, BFW - Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft [3)] Umweltbundesamt, [4)] Land Oberösterreich Gruppe Schutzwasserwirtschaft

Auftragnehmer

universität innsbruck
Arbeitsbereich für Wasserbau

Auftraggeber

ENVIRONMENT AGENCY AUSTRIA umweltbundesamt

LAND OBERÖSTERREICH

Ko-finanziert von

Bundesministerium
Landwirtschaft, Regionen
und Tourismus

mit Beiträgen von

Brandverhütungsstelle Oberösterreich

BFW. Bundesforschungszentrum für Wald

Im Rahmen dieser Studie wurden Berechnungen mit verschiedenen hydrodynamischen Softwarepaketen durchgeführt. Der Universität Innsbruck wurden dankenswerterweise Lizenzen für Hydro_AS-2D von der Firma Hydrotec und Lizenzen für FloodArea von der Firma Geomer für die Berechnungen zur Verfügung gestellt. Weiters wurden für ausgewählte Szenarien Berechnungen mit der Software JFLOW durch die Brandverhütungsstelle Oberösterreich durchgeführt. Deren Ergebnisse wurden für die durchgeführten Softwarevergleiche zur Verfügung gestellt.

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS 3

1. HINTERGRUND UND ZIELE DIESES LEITFADENS 4

2. ZWEIDIMENSIONALE HYDRODYNAMISCHE MODELLE 5

3. BEMESSUNGSREGEN UND KLIMAWANDELASPEKTE 7

4. GELÄNDEABBILDUNG: AUFLÖSUNGEN DGM UND RECHENNETZE 9
   - 4.1. Topographie / DGM 9
   - 4.2. Raster 10
   - 4.3. Rechennetz 11

5. BERÜCKSICHTIGUNG HYDRAULISCH RELEVANTER STRUKTUREN 13
   - 5.1. Gebäude 13
   - 5.2. Grundstückseinfriedungen, Mauern 13
   - 5.3. Durchlässe 14
   - 5.4. Siedlungsentwässerung, Kanal 15

6. RAUHEIT 16

7. VERLUSTANSATZ, ABFLUSSBEIWERT 20

8. KARTOGRAPHISCHE DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE 21
   - 8.1. Darstellung maximale Wassertiefe h_{max} 21
   - 8.2. Darstellung Wassertiefe und Geschwindigkeit 21
   - 8.3. Zusammenfassung kartographische Darstellung 23

9. PLAUSIBILITÄTSKONTROLLE 24

10. VERWENDETE LITERATUR 25

1. Hintergrund und Ziele dieses Leitfadens

Überflutungen durch oberflächlich abfließendes Wasser in Folge von Starkregenereignissen sind in den letzten Jahren in Österreich und im benachbarten Ausland vermehrt in den Blickpunkt von öffentlichem, medialem und wissenschaftlichem Interesse gerückt (u.a. Achleitner et al., 2020a; LUBW, 2016; Bernet et al., 2017; Lumassegger et al., 2016a, b; Zahnt et al., 2018; Kipfer et al., 2018; Starl, 2020). In den letzten Jahren konnten wiederholt entsprechende Schadensereignisse infolge kleinräumiger Starkregen beobachtet werden. Im Gegensatz zu Hochwässern an Flüssen (*fluviale Hochwässer*) sind Überflutungen durch Oberflächenabfluss nicht auf relativ gut abgrenzbare Gebiete entlang von bestehenden Wasserläufen beschränkt. Diese sogenannten *pluvialen Überflutungen* treten häufig mit kurzer Vorwarnzeit und in vielen Fällen weit abseits von Gewässern auf (Strehz et al. 2015), und stellen ein schwer kalkulierbares Überflutungsrisiko dar. Potenziell sind alle Regionen Österreichs gefährdet, wobei der exakte Ort und Zeitpunkt des Auftretens nur schwer vorhersagbar ist. Aktuelle Untersuchungen aus dem Bereich der Klimaforschung gehen zudem davon aus, dass die Niederschlagsintensitäten intensiver Starkregen mit kurzer Dauer in Zukunft noch weiter zunehmen können (u.a. Formayer u. Kromp-Kolb, 2009; Berg et al., 2013; Nissen u. Ulbrich, 2017; Giorgi et al., 2019; Becker, 2019). Informationen über eine mögliche Gefährdung durch Oberflächenabfluss sind dementsprechend als Planungsgrundlage für zukünftige Bauvorhaben und die Realisierung von Schutz- und Vorsorgemaßnahmen für Bestandsbauten von großem Interesse (Humer, et al. 2015; Achleitner et al., 2020a)

Zur Beurteilung der Überflutungsgefährdung durch Oberflächenabfluss nach Starkregenfällen sind in den letzten Jahren verschiedene Methoden vorgeschlagen und angewendet worden (z.B. Falconer et al., 2009; Fritsch et al., 2016; Humer et al., 2015). Eine Ersteinschätzung der Gefährdungssituation kann oft auf Basis lokaler Expertise und der Analyse abgelaufener Ereignisse erfolgen. Bekannte und offensichtliche Problembereiche können mit dieser Methode identifiziert werden, die Aussagekraft hinsichtlich möglicher zukünftiger oder bisher unbeobachteter Gefährdungsbereiche ist aber limitiert. Eine topographische Analyse digitaler Geländemodelle mit Hilfe von geographischen Informationssystemen kann hier zusätzlich flächendeckend Aufschluss über präferentielle Fließwege und mögliche neuralgische Punkte (z.B. Geländesenken, Unterführungen, mögliche Eintrittspunkte von konzentriertem Oberflächenabfluss in den Siedlungsraum) im Untersuchungsgebiet liefern. Für eine detaillierte Analyse der Gefährdung durch pluviale Überflutungen muss aber eine computergestützte zweidimensionale hydraulische Gefährdungsanalyse mittlerweile als Stand der Technik angesehen werden.

Die Gefährdungsanalyse mit zweidimensionalen hydrodynamischen Simulationsmodellen ermöglicht im Gegensatz zu den rein topographie-basierten Methoden eine Darstellung von Wasserspiegellagen und Überflutungstiefen, sowie möglichen auftretenden Fließgeschwindigkeiten; auch eine differenzierte Analyse unterschiedlicher Szenarien ist mit dieser Methode möglich.

Für die zweidimensionale hydrodynamische Modellierung von Oberflächenabfluss infolge von Starkniederschlägen gibt es mittlerweile eine wachsende Anzahl an verfügbaren Softwareprodukten mit unterschiedlichen Modellansätzen und implementierten Funktionen. Die Qualität und Aussagekraft dieser Modelle/Karten wird außerdem maßgeblich von den zugrundeliegenden Daten, getroffenen Annahmen und verwendeten Berechnungsansätzen beeinflusst.

Im Zuge des Forschungsprojektes RAINMAN wurden in einer Pilotstudie in oberösterreichischen Untersuchungsgebieten mehrere Softwarepakete für die Modellierung pluvialer Überflutungen angewendet und untersucht. Im vorliegenden Leitfaden werden Ergebnisse und Erfahrungen aus den durchgeführten Arbeiten zusammenfassend präsentiert. Der Leitfaden soll eine praxisorientierte Hilfestellung zur Modellierung und Risikogebietsausweisung von Oberflächenabfluss mit zweidimensionalen hydrodynamischen Modellen bieten.

2. Zweidimensionale hydrodynamische Modelle

Für die zweidimensionale hydrodynamische numerische Modellierung von Oberflächenabflüssen gibt es mittlerweile eine wachsende Anzahl von Softwarepaketen. Die verfügbaren Modelle unterscheiden sich dabei hinsichtlich der verwendeten hydrodynamischen Grundgleichungen (vollständige Flachwassergleichungen, vereinfachte hydraulische Berechnungsansätze), der verwendeten Rechennetzgeometrie (z.B. unstrukturierte Netze, raster-basiert) und ihrer Lizenzierung (open-source, freeware, kommerziell). In Bezug auf die Gefährdungsanalyse für Starkregenfälle bieten die unterschiedlichen Softwareprodukte zusätzlich verschiedene Funktionalitäten, wie z.B. die Möglichkeit der Berücksichtigung von Niederschlag als Randbedingung, die mögliche Kopplung an Modelle zur Berechnung der Kanalisation oder Funktionalitäten zur Modellierung von Abflussentstehungsprozessen.

Die grundsätzliche Eignung von Modellen für einen bestimmten Einsatz kann prinzipiell an Hand von sogenannten Benchmark-Tests überprüft werden. Dabei werden die Ergebnisse eines Modells für standardisierte Rechenbeispiele mit bekannten Resultaten verglichen (entweder theoretisch oder analytisch bekannte Resultate, oder Resultate vergleichbarer Modelle). Im Rahmen von RAINMAN wurden für vier Softwarepakete (Hydro_AS-2D, TELEMAC2D, HEC-RAS 2D, FloodArea) ausgewählte Benchmark-Beispiele (vgl. Neelz und Pender 2013) nachgerechnet. Für das Softwarepaket JFlow lagen die Ergebnisse der Benchmark-Tests bereits in Neelz und Pender (2013) vor. Zusammenfassend können sich Unterschiede zwischen den Ergebnissen verschiedener Modelle im Bereich bis zu einigen cm in der Wasserspiegellage bei gleichen Anfangs- und Randbedingungen ergeben, zu vergleichbaren Ergebnissen kommen auch Broich et al. (2018) bei ähnlichen Untersuchungen. Dies ist unter anderem auf die nachfolgenden Punkte zurückzuführen:

- Wahl des Modells (unterschiedliche hydrodynamische Grundgleichungen und deren numerische Implementierung)
- Wahl numerischer Modellparameter (z.B. Zeitschrittgröße, CFL-Grenzwerte, etc.) bei Wahl des gleichen Softwarepaketes
- Verschiedene Methoden zur Netzerstellung und damit einhergehende Differenzen in der Netzgeometrie/-topographie

Für die praktische Eignung/Anwendbarkeit zur Modellierung von pluvialen Überflutungen sind neben der ausreichend genauen Abbildung hydrodynamischer Prozesse auch noch zusätzliche Kriterien ausschlaggebend:

- Möglichkeit zur Eingabe des Niederschlages als Wasserquelle im Modell:
    - Ist die Eingabe des Niederschlags zeitlich variabel möglich?
    - Kann ein räumlich variabler/verteilter Niederschlag definiert werden?
- Hydrologischer Verlustansatz/hydrologisches Modell:
    - Sind Abflussbildungsmodelle in der Software implementiert? Welcher Modellansatz?
    - Sind alternative Möglichkeiten zur Berücksichtigung möglich (z.B. Knoten/Zellweise Eingabe von Nettoregen als Quellterm im hydrodynamischen Modell)
- Einbau hydraulisch relevanter Strukturen:
    - Können Mauern, Durchlässe etc. im Modell berücksichtigt werden und mit welcher Methode ist dies möglich?

Für die Simulation von Starkregen hängt die Wahl eines geeigneten Modelles in erster Linie von der zu beantwortenden Fragestellung ab. Die größten Vorteile der rasterbasierten Modelle liegen in einem

vereinfachten Preprocessing (die Netzerstellung entfällt, Rasterbasisdaten können direkt übernommen werden), in der meist schnelleren Berechnungszeit und der Möglichkeit, größere Gebiete in einem Rechenlauf zu modellieren. Im Gegensatz dazu sind unstrukturierte Netze deutlich flexibler und es können die Geometrien von Strukturen (Gebäude, Straßen, Gärten, Felder, Bruchkanten im Gelände) im Modell unabhängig von der gewählten Auflösung lagerichtig dargestellt werden. Diese Modelle sind mit einem höheren Bearbeitungs- und Berechnungsaufwand verbunden, allerdings bieten sie auch die Möglichkeit hydraulische Strukturen in einem hohen Detailgrad zu implementieren.

Im Hinblick auf die Modellierung von Oberflächenabflüssen in Folge von Starkregen, sollte insbesondere darauf geachtet werden, dass die verwendete Software in der Lage ist räumlich und zeitlich variierende Niederschlagseingangsdaten zu verarbeiten. Ist die Eingabe von räumlich und zeitlich variablem Niederschlag möglich, so kann vorab ein hydrologischer Verlustansatz unabhängig vom verwendeten Modell geschaltet werden (Eingabe von Nettoniederschlag). Für Anwendungen in urbanen Gebieten ist zudem eine mögliche Kopplung des verwendeten Modells mit Kanalnetzmodellen interessant.

Einen Überblick über Softwarepakete, die im Zuge der RAINMAN Pilotstudie Oberösterreich in unterschiedlicher Detailtiefe untersucht wurden, gibt Tabelle 1. Für eine ausführlichere Auflistung und Beschreibung der durchgeführten Untersuchungen sei an dieser Stelle auf den entsprechenden technischen Bericht verwiesen (Achleitner et al., 2020b).

Tabelle 1: Im Zuge von RAINMAN verglichenen Softwarepakete

Software	Version	Netz	Regen-input	Gleichung	Zeitl. var. NS	Räumlich variabler NS	Verlust modell	Wassertiefen-abhängiger k_{St}	Lizenzierung
Hydro_AS-2D	4.4.7 5.1.0	Unstrukt-uriert	ja	Flachwassergl.	ja	ja	nein*	ja	kommerziell
TELEMAC-2D	v7p2	Unstrukt-uriert	ja	Flachwassergl.	ja	nein**	SCS CN	nein**	open-source
HEC-RAS 2D	5.0.3	Unstrukt-uriert	ja	Flachwassergl.	ja	nein***	nein***	nein	freeware
FloodArea	10.3.0.734	Raster	ja	vereinfachter hydrodyn. Ansatz (Manning-Strickler Formel)	ja	ja****	nein*****	nein	kommerziell
JFLOW	9.4	Raster	ja	Flachwassergl.	ja	ja	SCS-CN*	ja	kommerziell

* In Hydro_AS-2D erfolgt die Eingabe des Niederschlages in den Knoten, eine Berücksichtigung des Verlustes kann in der Standardversion über die Eingabe des Nettoregens erfolgen. An der Universität Innsbruck wurde ein Skript zur Berücksichtigung von Anfangs- und Dauerverlust bzw. des SCS-CN Verlustmodelles für die Hydro_AS-2D Version 4.4.7 entwickelt. In JFLOW erfolgt die Eingabe des Niederschlages in den Rasterzellen, bei diesem Modell ist das SCS-CN Verfahren implementiert und es kann ebenfalls eine Berücksichtigung des Verlustes über Nettoregen erfolgen.

** Telemac-2D kann auf Grund des offenen Quellcodes prinzipiell um diese Funktionalität erweitert werden.

*** Es gibt Pläne der HEC-RAS Entwickler, die Version 5.1 der Software um diese Funktionalität zu erweitern

**** Die Berücksichtigung eines räumlich variablen Niederschlages ist grundsätzlich möglich, erfordert aber ggf. sich näher mit der Software auseinander zu setzen (Modellneustarts oder Scripting der FloodArea Toolbox uU. nötig)

***** Hydrologische Verlustmodelle sind nicht in FloodArea implementiert, die Möglichkeit besteht aber, über Pre-Processing Scripts die Software diesbezüglich zu erweitern (vgl. z.B. Tyrna et al., 2017)

3. Bemessungsregen und Klimawandelaspekte

Untersuchungen zu abgelaufenen pluvialen Überflutungen in weiten Gebieten Oberösterreichs im Sommer 2016, sowie Erfahrungen aus anderen Regionen legen nahe, dass vor allem intensive Niederschläge mit kurzer Dauerstufe als Auslöser für Überflutungen durch oberflächlich abfließendes Wasser/Hangwasser fungieren (Achleitner et al., 2020a; Lumassegger et al., 2016a, b; Strehz, A., 2015).

Als Richtwert für die Erstellung von Gefahrenhinweiskarten wird an dieser Stelle vom Amt der Oberösterreichischen Landesregierung die Verwendung eines **100-jährlichen eHYD-Bemessungsregens mit der Dauerstufe 60min** empfohlen. Dabei ist nachvollziehbar zu dokumentieren, welche eHYD-Gitterpunkte für die Untersuchung verwendet werden. Wenn für das Untersuchungsgebiet mehrere eHYD-Gitterpunkte in Frage kommen, muss jedenfalls auch nachvollziehbar dokumentiert werden, welche Methode für die Kombination von Bemessungswerten aus verschiedenen Gitterpunkten verwendet wurde (z.B. Maximalwert, flächengewichtetes Mittel, „nearest-neighbour“ Verfahren, etc.). Als Vereinfachung, und zur leichteren Vergleichbarkeit kann dabei eine zeitlich konstante Verteilung der Regenintensität über die Regendauer angenommen werden (Blockregen). Abbildung 1 zeigt die Verteilung der 100jährlichen Regensummen mit Dauerstufe 60min für Oberösterreich, auf Basis der aktuell gültigen Bemessungsniederschläge (Stand Mai 2020); die stündlichen Regensummen reichen dabei je nach geographischer Lage von etwa 40mm bis 96mm.

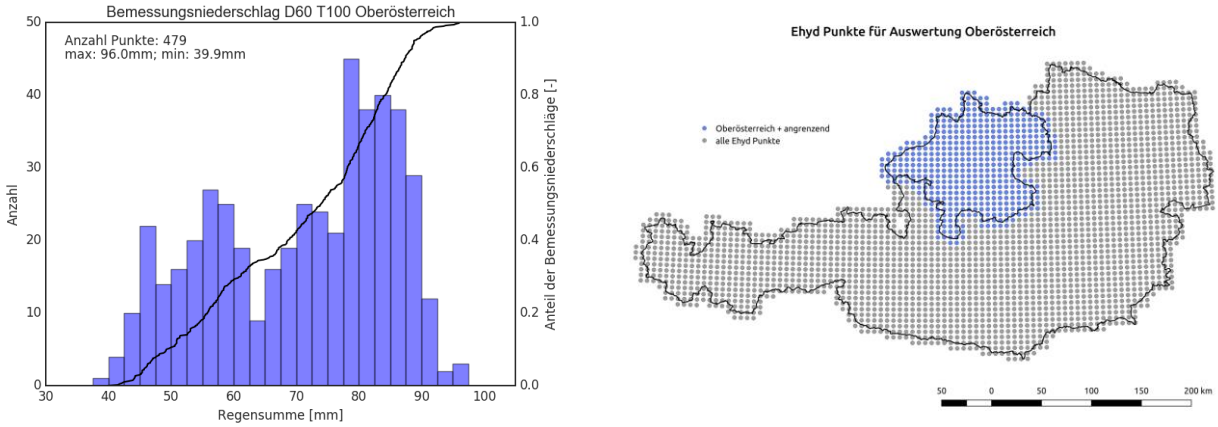

Abbildung 1: Verteilung der 100jährlichen eHYD Bemessungsregen mit Dauer 60min für Oberösterreich (links) und für die Auswertung herangezogene eHYD-Gitterpunkte (rechts).

Im Zuge des Klimawandels ist, einhergehend mit der als sehr wahrscheinlich einzuschätzenden Zunahme der Temperaturen, auch mit einer Steigerung der Intensität auftretender Niederschlagsereignisse zu rechnen. Der mögliche Einfluss zukünftiger klimatischer Entwicklungen auf die Gefährdung durch Überflutungen in Folge von Starkniederschlagsereignissen wurde in der RAINMAN Pilotstudie Oberösterreich nicht dezidiert untersucht, entsprechende Untersuchungen für ausgewählte Gebiete in Oberösterreich wurden jedoch in den beiden Projekten SAFFER-CC und AQUACLEW (https://aquaclew.eu) durchgeführt (Strehz et al., 2015; Lumassegger et al., 2016a). Die Ergebnisse dieser Studien zeigen, dass für verschiedene Regionen in Oberösterreich mit den zu erwartenden steigenden Temperaturen in Zukunft auch mit einer Zunahme der Niederschlagsintensitäten zu rechnen sein wird. Je extremer dabei das Niederschlagsereignis (d.h. je geringer dessen Auftretenswahrscheinlichkeit bzw. größer dessen Wiederkehrperiode) und je kürzer die Niederschlagsdauer, desto stärker könnten die Intensitäten der Niederschlagsereignisse im Vergleich zur aktuellen Situation steigen. Niederschläge mit Dauerstufen von 60min oder weniger könnten dabei pro °Celsius an Temperatursteigerung um bis zu 10% intensiver ausfallen als unter aktuellen Bedingungen. Für Niederschlagsereignisse mit längerer Dauer liegen mögliche

Steigerungsraten aus derzeitiger Sicht um die 7%/°Celsius oder darunter. Diese Einschätzungen decken sich überwiegend mit Ergebnissen und Einschätzungen aus verschiedenen Publikationen zu diesem Thema (u.a. Lenderik und van Meijgaard, 2008; Formayer und Kromp-Kolb, 2009; Berg et al., 2013; Formayer und Fritz, 2017; Giorgi et al., 2019; Becker, 2019). Basierend auf diesen Annahmen ist davon auszugehen, dass in Zukunft die Anzahl betroffener Gebäude und überfluteter Flächen bei entsprechend ähnlichen Vorbedingungen in den betroffenen Gebieten noch deutlich größer sein könnte als unter aktuellen Randbedingungen.

Eine explizite Berücksichtigung möglicher Klimawandelauswirkungen bei der Hangwassermodellierung für Bemessungsfragen und Gefahrenhinweiskarten erfolgt aktuell nicht. Die entsprechenden formalen und rechtlichen Grundlagen sind noch nicht in ausreichendem Maße gegeben um Klimawandelaspekte bei Starkniederschlägen zu berücksichtigen. Jedoch erfolgt eine entsprechende regelmäßige Aktualisierung der Bemessungsniederschläge basierend auf über längere Zeiträume verfügbaren Niederschlagszeitreihen (vgl. Weilguni, 2019). Darüber hinaus wird anhand von beobachteten Ereignissen laufend die Dauerstufe auf Plausibilität überprüft.

4. Geländeabbildung: Auflösungen DGM und Rechennetze

Der Einfluss unterschiedlicher Netzauflösungen auf die Ergebnisse zweidimensionaler hydrodynamischer Berechnungen ist aus praktischer Sicht vor allem in Hinblick auf die Qualität verfügbarer Eingangsdaten für die Modellierung und die benötigten Rechenkapazitäten in Relation zum betrachteten Untersuchungsbiet interessant. Eine Erhöhung des Detailgrades und der Komplexität eines Modelles ohne eine entsprechend detaillierte Datengrundlage und Fokus auf das Ziel der Berechnung resultiert nicht zwangsläufig in einer höheren Aussagekraft der Modellresultate (Schubert et. al, 2008; Schubert und Sanders, 2012). In der Praxis gilt es daher in der Modellierung einen geeigneten Kompromiss zwischen Detailgrad und Bearbeitungs- und Berechnungsaufwand zu finden.

4.1. Topographie / DGM

Für die Modellierung von Oberflächenabfluss ist eine detaillierte Abbildung der Geländeoberfläche und hydraulisch relevanter künstlicher und natürlicher Strukturen besonders wichtig um das Abflussverhalten an der Oberfläche möglichst realitätsnah abbilden zu können. Für die Modellierung wird daher ein DGM mit einer Auflösung von ≤1m empfohlen. In Oberösterreich sind Laserscan basierte gerasterte Höhenmodelle aktuell in den Auflösungen von 0.5m und 1m frei verfügbar (https://www.land-oberoesterreich.gv.at/211787.htm). Diese Rasterhöhenmodelle bieten eine gute Ausgangsbasis für die Modellierung von Oberflächenabfluss, ein entsprechender Plausibilitätscheck bzw. eine Nachbearbeitung des Höhendatensatzes für das betrachtete Untersuchungsgebiet sollte vom Modellierer jedoch jedenfalls erfolgen. Insbesondere die folgenden Bereiche im Höhenmodell sollten u.a. genauer betrachtet und kritisch mit der tatsächlichen Situation vor Ort abgeglichen werden:

- Bauwerke als Abflusshindernisse (z.B. Gebäude, Mauern, Dämme, Wälle, etc.)
- Unterführungen, Brücken, Durchlässe und Verdolungen
- Kleingerinne, Runsen und Gräben (vgl. Abbildung 2)

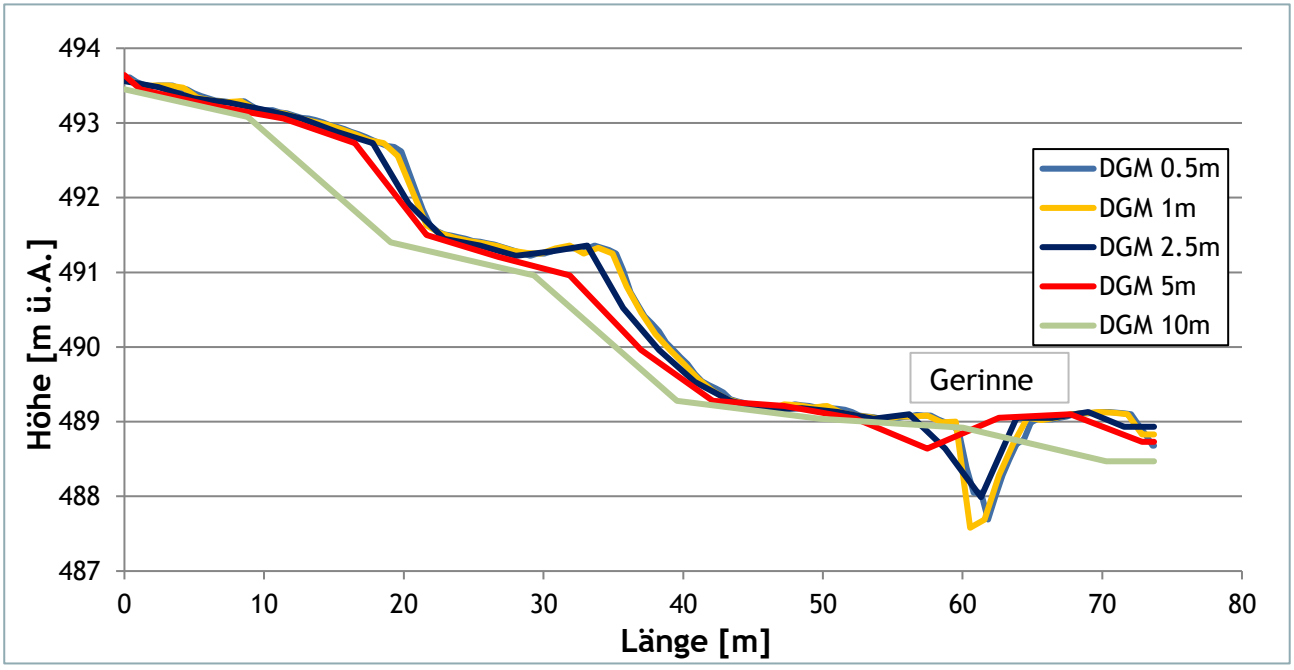

Abbildung 2: Schnitt durch verschiedene Rasterhöhenmodelle (Gebiet Seewalchen), das Gerinne wird ab einer Auflösung von 5m nicht mehr abgebildet.

In Abhängigkeit vom verwendeten hydrodynamischen Modell können Bereiche, in denen das Geländemodell nicht mit der Situation vor Ort übereinstimmt, entsprechend nachbearbeitet werden. Jedenfalls sollte im Zuge der Modellierung nachvollziehbar dokumentiert werden, an welchen Stellen das Geländemodell nachbearbeitet wurde, und wo trotz Nachbearbeitung an Hand der verwendeten Datengrundlage ggf. noch mit Diskrepanzen zum realen Abflussverhalten zu rechnen ist.

4.2. Raster

Bei rasterbasierten Modellen bestimmt die Auflösung des digitalen Geländemodelles die Auflösung des einheitlichen Rechennetzes. In diesen Modellen kann die Geometrie von Bruchkanten nicht exakt abgebildet werden und es ergeben sich Abweichungen zur Vektordarstellung in Abhängigkeit der Rasterauflösung. Wie in Abbildung 3 ersichtlich ergeben sich mit Vergröberung der Auflösung immer erheblichere Abweichungen; z.B. bei der Abbildung von Gebäudeflächen oder der Abgrenzung von Bereichen mit unterschiedlichen hydrologischen und hydraulischen Eigenschaften (z.B. Verkehrsflächen, Wald, landwirtschaftliche Flächen, etc.).

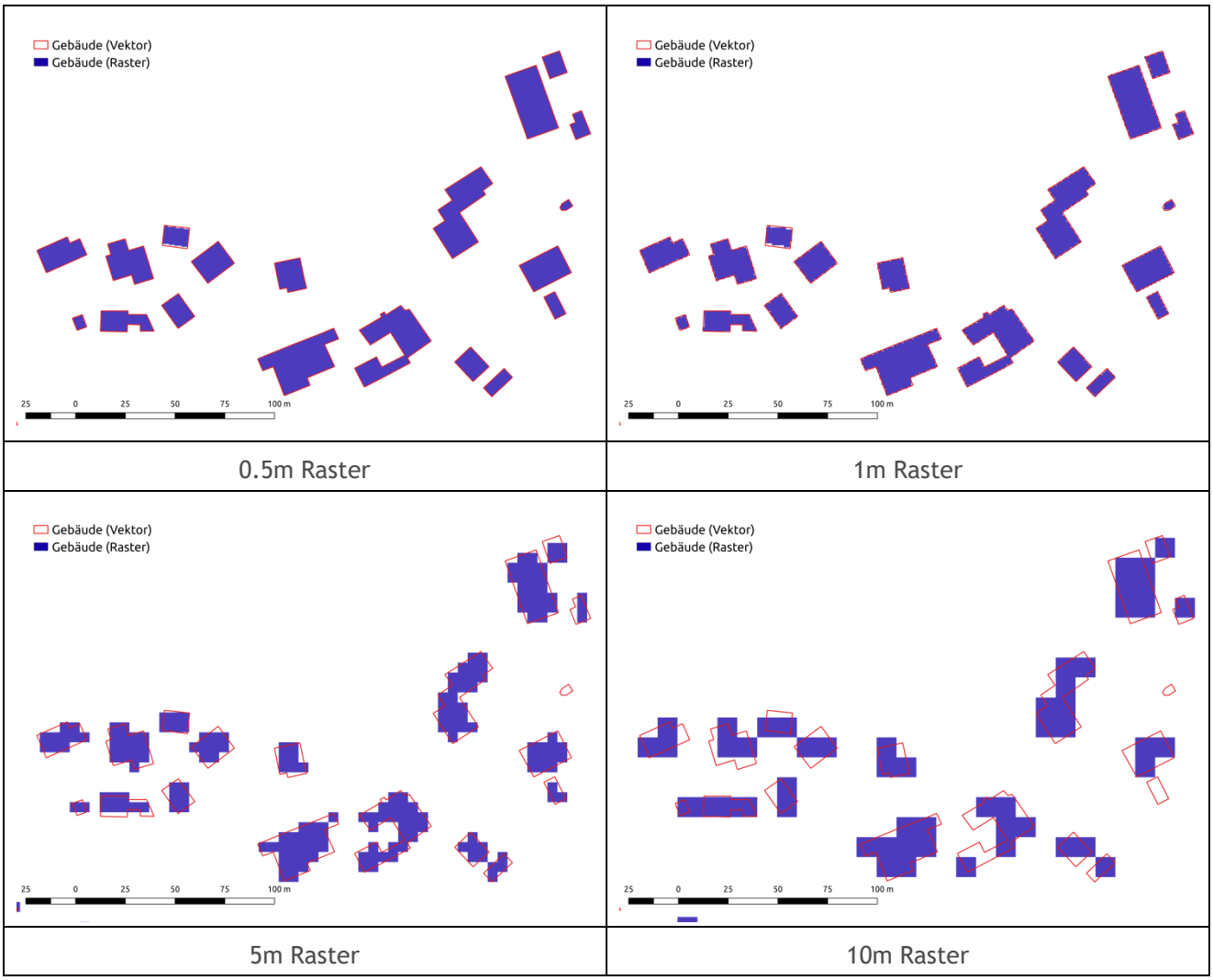

Abbildung 3: Repräsentation von Gebäuden in unterschiedlichen Rasterauflösungen im Vergleich zu den Vektorumrissen (Rechennetze) der Gebäude.

Bei rasterbasierten Modellen sind folgende Punkte zu beachten:

- Da die Rasterauflösung über die gesamte Rechendomäne konstant ist, richtet sich die erforderliche Auflösung nach den Bereichen, in denen die detaillierteste Information nötig ist. In den meisten praktischen Anwendungen wird dies im Siedlungsgebiet der Fall sein.
- Bei der Wahl der Rasterauflösung muss vom Modellierer darauf geachtet werden, dass hydraulisch relevante Strukturen (z.B. Gebäude) in ausreichend guter Auflösung abgebildet werden. Ab einer Rasterauflösung gröber 1m können z.B. die Geometrien von Gebäuden oder anderen hydraulisch relevanten Strukturen nur mehr unzureichend genau abgebildet werden. Die Verwendung von raster-basierten Modellen ist deshalb in der Praxis nur in Kombination mit hochaufgelösten digitalen Geländemodellen zielführend.
- Vom Amt der Oberösterreichischen Landesregierung wird für die rasterbasierte Modellierung von Oberflächenabfluss/Hangwasser eine Rasterauflösung ≤ 1m empfohlen. Entsprechende digitale Geländemodelle, basierend auf Laserscanbefliegungen sind für Oberösterreich flächendeckend verfügbar und können durch die freie Lizensierung (Creative Commons 4.0) kostenlos bezogen und genutzt werden.

4.3. Rechennetz

Bei flexiblen Rechennetzen können die Geometrien von Strukturen nahezu unabhängig von der gewählten Netzauflösung lagerichtig abgebildet werden. Hier sind Rechennetze anpassungsfähiger als Raster, da Bruchkanten unabhängig vom Höhenmodell, z.B. anhand der jeweiligen Landnutzungsklasse definiert werden können. Höheninformationen werden erst nachträglich an den Knotenpunkten des Rechennetzes interpoliert, wodurch die Erstellung und Qualität der Rechennetze von der Auflösung des digitalen Geländemodelles weitgehend unabhängig sind (lediglich die Höheninformation an den Netzknoten wird aus dem Höhenmodell übernommen). Um die Anforderungen an die Genauigkeit und Rechenzeit zu erfüllen sollte ein Rechennetz so fein wie nötig und so grob wie möglich erstellt werden. Es gilt eine Balance zwischen Darstellung wichtiger Strömungsdetails und einer akzeptablen Rechenzeit zu finden. Generell ist die Modellierung mit Rechennetzen mit einer höheren Bearbeitungs- und Rechenzeit verbunden als die rasterbasierte Modellerstellung.

Für Modelle mit flexiblen Rechennetzen sind folgende Punkte zu beachten:

- Unabhängig von der gewählten Netzauflösung sollte immer das DGM mit der höchsten verfügbaren Auflösung interpoliert werden. In Oberösterreich wird die Verwendung des 0.5m DGM empfohlen.
- Die Qualität der Abbildung der Bruchkanten hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Simulationsergebnisse.
- Bei großen Netzen (> 1Mio Knoten) kann zur Optimierung der Rechenzeiten eine unterschiedliche Auflösung im Siedlungsbereich und im Vorlandbereich (Forst- und Landwirtschaftsflächen) sinnvoll sein. Bei Vergrößerung der Netzelemente im Vorlandbereich ist darauf zu achten, dass die durch die Geländeform vorgegebenen Fließwege wie z.B Wege oder Straßen in Hanglage, aber auch kleine Gräben erhalten bleiben, die die Fließrichtung maßgeblich verändern können. Die Untersuchungen in RAINMAN legen nahe, dass eine Netzauflösung im Vorland gröber als 2.5m die Fließwege maßgeblich verändern kann und somit grundsätzlich nicht empfohlen werden kann (vgl. Abbildung 4 und Abbildung 5). Eine Vergröberung der Netzauflösung darüber hinaus ist jedenfalls fachlich fundiert zu begründen. Der Zufluss in Siedlungsgebiete oder andere Untersuchungsgebiete (z.B. Bauerwartungsland) sollte dabei nach Möglichkeit anhand von Kontrollquerschnitten überprüft werden.

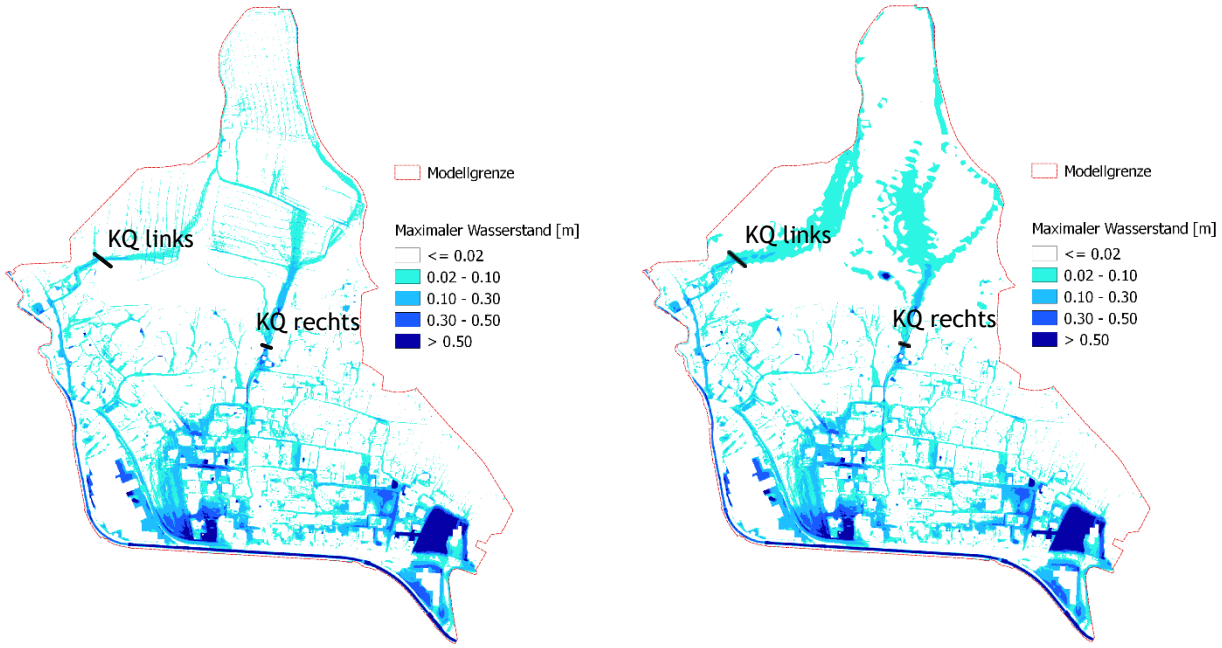

Abbildung 4: Überflutungskarte mit einer Netzauflösung im Freilandbereich (oberhalb der Kontrollquerschnitte) von 0.5m (links) und 10m (rechts) bei gleicher Auflösung im Siedlungsbereich (unterhalb der Kontrollquerschnitte). Es zeigen sich visuell bereits Unterschiede in den modellierten maximalen Wassertiefen; ein größerer Teil des Freilandbereiches entwässert bei gröberer Netzauflösung (rechts) in den linken Abflussquerschnitt.

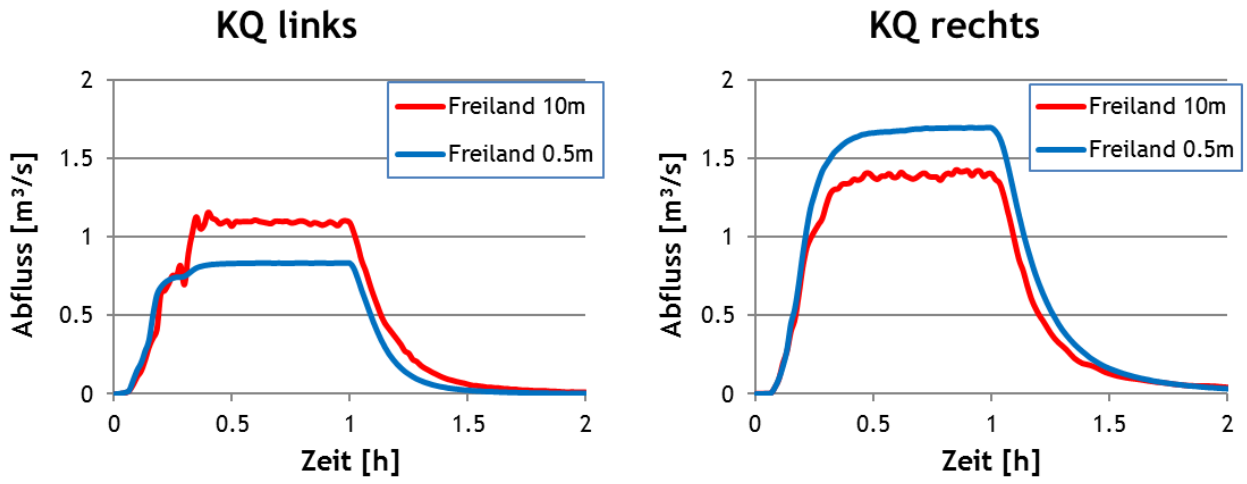

Abbildung 5: Zugehörige Abflussganglinien zu den Kontrollquerschnitten in Abbildung 4, diese zeigen deutlich eine Verlagerung des Abflusses aufgrund veränderter Netzauflösung im Freilandbereich (im Kontrollquerschnitt links ist der Abfluss bei Netzauflösung 10m größer als bei 0.5m Netzauflösung, im Kontrollquerschnitt rechts verhält es sich genau umgekehrt).

5. Berücksichtigung hydraulisch relevanter Strukturen

Hydraulisch relevante Strukturen wie Gebäude, Mauern, Durchlässe, Dämme oder Gräben können die Abflussverhältnisse wesentlich beeinflussen. Diese Strukturen werden in den derzeit frei verfügbaren digitalen Geländemodellen nicht immer adäquat abgebildet und müssen in das Berechnungsnetz über eine Geländemodifikation oder als Randbedingung implementiert werden. In Achleitner et al. (2020b) wurde untersucht, inwieweit abflussrelevante Strukturen in der hydrodynamischen Modellierung adäquat abgebildet werden können. Dafür wurden die Möglichkeiten der Berücksichtigung verschiedener Strukturen in rasterbasierten (FloodArea, JFlow) und netzbasierten (Hydro_AS-2D) Modellen untersucht und ihr Einfluss an Hand der Sensitivität der Ergebnisse analysiert. Es wird generell empfohlen, die Plausibilität der getroffenen Annahmen im Modell vor Ort im Zuge eines Lokalaugenscheins unter Einbeziehung von Feuerwehr, Bürgermeister/Bauamtsleiter und betroffenen Anwohnern zu überprüfen.

5.1. Gebäude

Im Gegensatz zu den digitalen Oberflächenmodellen (DOM), sind in den digitalen Geländemodellen (DGM) keine Informationen zu Gebäudehöhen enthalten. Grundsätzlich gibt es verschiedene Möglichkeiten, wie Gebäude bei der Anwendung von 2D hydrodynamischen Modellen berücksichtigt werden können. In diesem Leitfaden werden folgende Methoden empfohlen:

- **Einbau als Block** („Building Block“) – Erhöhung der z-Werte der Gebäudezellen im Rechennetz; Gebäude werden um einen definierten Wert erhöht.
- **Ausstanzen aus dem Rechennetz** („Building Hole“) – Aussparung der Gebäudeflächen aus dem Rechennetz (geschlossene Randbedingungen an Gebäudekanten, Definition als nicht durchströmbare Fließhindernisse)

Eine direkte Beregnung von Gebäudeflächen im Modell ist bei diesen beiden Methoden nur beim Einbau als Block („Building Block“ Methode) möglich (Erhöhung des z-Wertes). Dabei ist aber vom Modellierer auch darauf zu achten, dass die Dachgeometrie einen entsprechenden Ablauf des Wassers von den Gebäuden ermöglicht (keine Senken auf Gebäuden). Diese Methode kann an den Gebäuden und in deren Nahbereich unplausible Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten liefern. Diesbezüglich wird empfohlen das Verhalten des verwendeten Modells entsprechend zu überprüfen und ggf. den Regenanteil, der über den Dachflächen fällt nicht auf den Gebäudeflächen, sondern über eine aliquote Erhöhung des Niederschlages im Gebäudeumfeld zu berücksichtigen. Dieses Vorgehen ist prinzipiell auch beim Ausstanzen der Gebäude aus dem Rechennetz („Building Hole“ Methode) möglich. Wichtig dabei ist, den auf die Gebäudeflächen fallenden Niederschlag entsprechend dem Regenszenario zu berücksichtigen. Bei geringen Jährlichkeiten des Niederschlags kann davon ausgegangen werden, dass eine lokale Versickerung bzw. die Ableitung durch den Kanal gegeben sind. Bei größeren Jährlichkeiten – wie üblicherweise bei Starkregenbetrachtungen gegeben – erfolgt eine Überlastung des Kanals und der überwiegende Teil des Niederschlags kommt oberflächlich zum Abfluss. In diesem Fall wird eine Beregnung der Dachflächen bzw. eine aliquote Anpassung/Erhöhung der Regenmengen im Siedlungsgebiet für das Überflutungsbild im Siedlungsbereich empfohlen; insbesondere in Untersuchungsgebieten mit hoher Bebauungsdichte.

5.2. Grundstückseinfriedungen, Mauern

Im Ereignisfall können im Siedlungsbereich Grundstückseinfriedungen in Form von Zäunen, Mauern oder Hecken die lokalen Strömungsverhältnisse beeinflussen. Da die hydraulische Wirksamkeit von teilweise durchlässigen Abgrenzungen wie Zäunen oder dichter Vegetation im Ereignisfall nur schwer abschätzbar ist, können diese in den Oberflächenabflussmodellen näherungsweise vernachlässigt werden. Nur wenn

eine entsprechende hydraulische Relevanz anhand von lokalen Beobachtungen angenommen werden muss, wird eine entsprechende Berücksichtigung im Modell empfohlen. In Achleitner et al. 2020b konnten für Mauern bis zu einer Höhe von 10cm an einem Beispiel keine relevanten Auswirkungen auf die maximalen modellierten Wassertiefen im Siedlungsgebiet festgestellt werden. Das Amt der Oberösterreichischen Landesregierung empfiehlt bei der Modellierung von Oberflächenabfluss für Starkregenereignisse Mauern bis 10cm und damit auch Bordsteine näherungsweise zu vernachlässigen. Werden Mauern im Modell eingebaut, sollten vorhandene Öffnungen (Einfahrten, Gartentore) möglichst realitätsnahe berücksichtigt werden.

Mauern können im Berechnungsnetz über folgende Methoden berücksichtigt werden:

- **Einbau als Block** – Erhöhung der z-Werte um die Mauerhöhe im Rechennetz/Raster, Mauern werden bei dieser Variante mit einem Höhenversatz zum natürlichen Gelände (bzw. den Höhenwerten im Geländemodell) berücksichtigt und sind überströmbar. Grundsätzlich tritt beim Einbau von Mauern das Problem auf, dass diese deutlich schlanker als die umgebenden Netzelemente bzw. Rasterzellen sind. Bei Einbau in ein Rastermodell müssen Einschränkungen, die sich aus der Rasterauflösung ergeben bei der Übersetzung zwischen Vektor- und Rastergeometrie berücksichtigt werden. Insbesondere da Mauern meist nur eine Breite von wenigen Dezimetern haben, ist eine geometrisch exakte Abbildung der Strukturen im Rastermodell nur eingeschränkt möglich. Bei Modellen mit flexiblen Netzen ist durch die nötige feine Netzauflösung (bedingt durch die geringe Breite der Mauern) unter Umständen mit einem hohen Bearbeitungsaufwand in der Netzerstellung in diesen Bereichen zu rechnen.
- **Einbau als Wehrüberfall** – Bei dieser Methode werden Mauern als undurchströmbare Hindernisse definiert und anschließend über die Randbedingung Wehrüberfall berücksichtigt (z.B. in Hydro_AS-2D). Hierfür müssen Überfallbeiwert, Segmentbreite und Kronenhöhe definiert werden. Die Randbedingung Wehrüberfall ist nicht in allen Softwarepaketen implementiert.
- **Einbau als undurchstömbares Fließhindernis**: Mauerelemente im Rechennetz/-raster werden als nicht-durchströmbare Fließhindernisse im Modell realisiert. Ein Überströmen der Mauerelemente ist in diesem Fall nicht möglich, was v.a. bei geringen Mauerhöhen berücksichtigt werden muss.

Die Wahl der geeigneten Methode ist aus Sicht der Autoren abhängig vom Untersuchungsgebiet. Die Berücksichtigung von Mauern als nicht überströmbares Fließhindernis macht nur in Bereichen Sinn, in denen ein Überströmen auch in der Realität ausgeschlossen werden kann, ansonsten wird eine Erhöhung der Mauer im Rechennetz/-raster entsprechend den realen Gegebenheiten empfohlen; bei Einbau in flexiblen Rechennetzen ist dabei auf die Netzqualität in diesen Bereichen besonders zu achten (in Hydro_AS-2D sollten Mauern z.B. durch mindestens 2 Netzelemente diskretisiert werden, vgl. Achleitner et al., 2020b). Der Einbau von Mauern als Wehrüberfall ist im Vergleich zu den beiden anderen Methoden aufwändiger und auch nicht in allen Modellen realisierbar; die Verwendung dieser Methode sollte vom Modellierer im Einzelfall beurteilt und begründet werden.

5.3. Durchlässe

In wie weit es sinnvoll ist, Durchlässe wie z.B. Verrohrungen oder Unterführungen in der hydrodynamischen Modellierung zu berücksichtigen, hängt vom betrachteten Szenario und der Dimension des Durchlasses ab. In der Praxis muss damit gerechnet werden, dass in Abhängigkeit von Durchmesser, Lage und baulicher Ausführung des Durchlasseinlaufes und der Ereignischarakteristik Durchlässe im Ereignisfall nur eine beschränkte Wirksamkeit aufweisen können (Achleitner et al. 2020a). Durchlässe bis zu einem Durchmesser DN300 haben selbst bei voller Wirksamkeit nur geringfügige Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse (Achleitner et al. 2020b). Das Amt der Oberösterreichischen Landesregierung empfiehlt, Durchlässe kleiner DN300 nicht im Modell zu berücksichtigen und bei Implementierung von Durchlässen auf lokaler Detailebene die hydraulische Wirksamkeit bei Extremereignissen vor Ort vom

Fachplaner überprüfen zu lassen. Bei Berücksichtigung von Durchlässen im Modell sollten auch Überflutungsszenarien infolge Verlegung von Einlaufbauwerken betrachtet werden.

Große Durchlässe (z.B. Unterführungen, Bahndurchlässe etc.), die auch im Ereignisfall mit hoher Wahrscheinlichkeit abflusswirksam bleiben, sollten jedenfalls berücksichtigt werden, um die Abflussverhältnisse im Modell möglichst realitätsnah abzubilden (vgl. Achleitner et al. 2020a; Starl, 2020). Entsprechend große Durchlässe können z.B. als Bresche im Rechennetz ausgeführt werden. Alternative Methoden zum Einbau von Durchlässen variieren je nach verwendetem Modell, weshalb hier nicht näher darauf eingegangen wird. Wichtig ist jedenfalls auch hier die Nachvollziehbarkeit der Modellierung durch entsprechende Dokumentation der Netzerstellung zu gewährleisten.

5.4. Siedlungsentwässerung, Kanal

Dieser Leitfaden bezieht sich auf die Modellierung von Hangwasser/Oberflächenabfluss in ländlichen Gebieten in denen die Siedlungsentwässerung im Gegensatz zu urbanen Gebieten eine tendenziell eher untergeordnete Rolle spielt (Achleitner, et al. 2020a). Die Siedlungsentwässerung wird in Österreich auf Ereignisse bemessen, deren Wiederkehrintervall deutlich geringer ist als die in diesem Leitfaden betrachteten Jährlichkeiten. Im Regelfall kann davon ausgegangen werden, dass bei extremen Starkregenereignissen das Kanalnetz überlastet ist. Bei mehreren pluvialen Hochwasserereignissen in Oberösterreich konnte eine Verlegung von Einlaufschächten durch transportiertes Sediment oder Geschwemmsel beobachtet werden. Für die Modellierung von Oberflächenabfluss in ländlichen Gebieten wird vom Amt der Oberösterreichischen Landesregierung aus den oben genannten Gründen die Berücksichtigung einer abflussmindernden Wirkung der Kanalisation nicht empfohlen; auch eine gekoppelte Modellierung von Kanalnetz und Oberflächenabfluss wird derzeit nicht vorausgesetzt. Muss auf Basis lokaler Einschätzungen oder durch Erfahrungen aus abgelaufenen Ereignissen davon ausgegangen werden, dass sich Siedlungsentwässerungsanlagen im Ereignisfall punktuell abflussverschärfend auswirken, so kann dies entsprechend vereinfacht im Modell berücksichtigt werden (z.B. Berücksichtigung als punktuelle Quellen im Modell).

6. Rauheit

Die Rauheit einer Geländeoberfläche wird von einer Vielzahl von Parametern (Bewuchs, Oberflächenbeschaffenheit, etc.) beeinflusst. In Sensitivitätsuntersuchungen konnte beobachtet werden, dass bei rauer Parametrisierung die maximale Überflutungshöhe tendenziell zunimmt (Abbildung 7 links) und die Fließgeschwindigkeit tendenziell abnimmt (Abbildung 8 links). Neben den Auswirkungen auf den maximalen Wasserstand muss auch die Abflussdynamik betrachtet werden. Die Erhöhung der Rauheit führt zu Fließverzögerungen wodurch Abflussspitzen später auftreten. Dies ist auch aus Abbildung 7 links ersichtlich, in den tiefer gelegenen Bereichen können die geringeren Wassertiefen auf diese Fließverzögerung zurückgeführt werden. Die Rauheit kann oft (aufgrund des Fehlens von Ereignisdokumentationen die sich zum Kalibrieren des Modelles eignen würden) nur nach Plausibilität der Ergebnisse (Wassertiefen, Abflussspitzen) und Landnutzungsinformationen gewählt werden. Dabei ist auf ein plausibles Abflussverhalten Bedacht zu nehmen (siehe Kapitel 9).

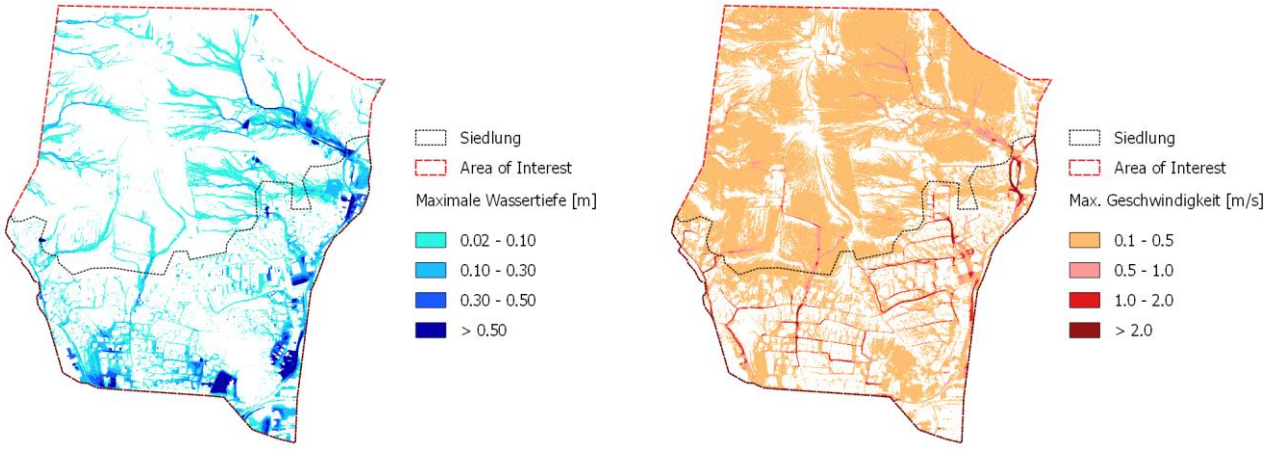

Abbildung 6: Referenzszenario berechnet mit Hydro_AS-2D (mittlere Rauheiten). Darstellung der maximalen Wassertiefen (links) und maximalen Fließgeschwindigkeiten (rechts).

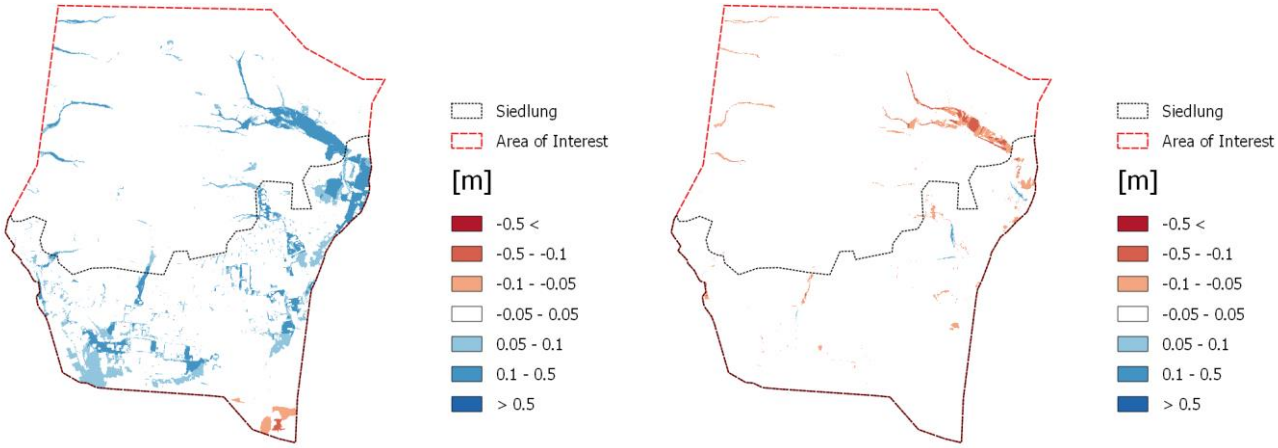

Abbildung 7: Veränderung der Wassertiefe gegenüber dem Referenzszenario berechnet mit Hydro_AS-2D, bei rauer Parametrisierung treten generell höhere Wassertiefen auf (links). Bei glatter Parametrisierung werden niedrigere Wassertiefen berechnet (rechts).

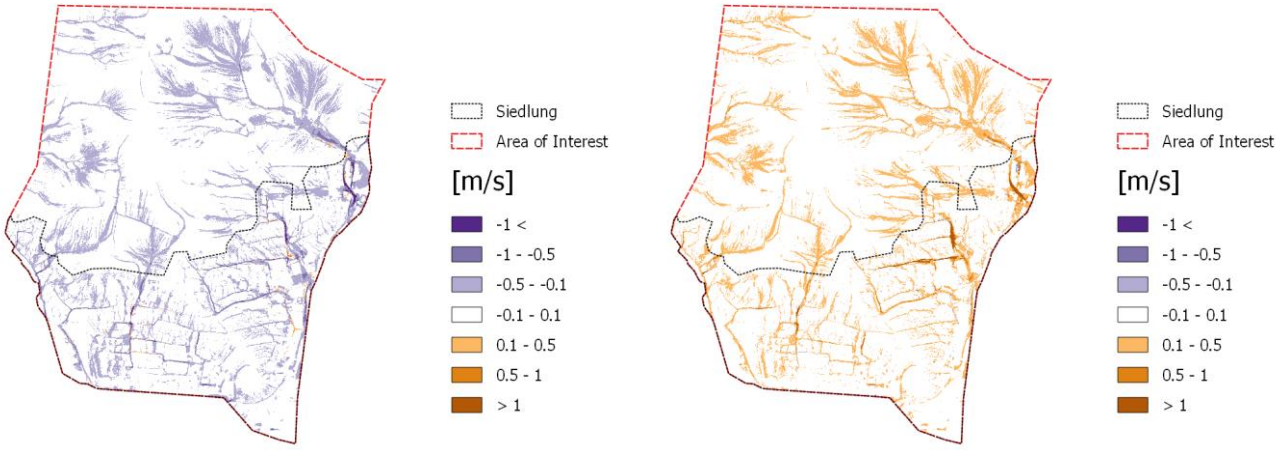

Abbildung 8: Veränderung der Fließgeschwindigkeit gegenüber dem Referenzszenario berechnet mit Hydro_AS-2D, bei rauer Parametrisierung treten geringere Fließgeschwindigkeiten auf (links). Bei glatter Parametrisierung werden höhere Fließgeschwindigkeiten im Vergleich zum Referenzszenario modelliert.

In den meisten Softwarepaketen, die aktuell für die Modellierung von Oberflächenabflüssen in der Praxis Anwendung finden, ist ein Fließwiderstandsansatz nach Manning- und Strickler implementiert. Das gilt auch für die Softwarepakete, die in der RAINMAN Pilotstudie in Oberösterreich verwendet wurden. Eine Parametrisierung des Fließwiderstandes verschiedener Oberflächenklassen erfolgt dabei über die Definition von entsprechenden Manning- oder Stricklerbeiwerten für diese Flächen. Grobe Wertebereiche für unterschiedliche Oberflächen können für die praktische Anwendung aus verschiedenen Literaturquellen bezogen werden, eine Plausibilisierung der Parametrisierung an Hand lokaler Informationen sollte aber in jedem Fall vom Modellierer erfolgen. Der Leitfaden für kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg fasst dies wie folgt zusammen:

- *„Im hydraulischen Modell sind die Rauigkeiten der Geländeoberfläche für die örtlichen Verhältnisse entsprechend den vorhandenen Oberflächenbeschaffenheiten und -nutzungen so anzusetzen, dass realistische Überflutungstiefen und Fließgeschwindigkeiten erzielt werden.“* (LUBW, 2016)

Ergebnisse aus den Untersuchungen in den RAINMAN Pilotgebieten Schwertberg und Seewalchen zeigen auch auf, dass je nach modelltechnischer Umsetzung (Numerik, hydraulische Grundgleichungen) die Sensitivität der Modellergebnisse gegenüber verschiedenen Parametrisierungen des Fließwiderstandes durchaus unterschiedlich sein kann. Eine rauere Parametrisierung für die betrachteten Beispiele führte dabei erwartungsgemäß jeweils zu tendenziell höheren simulierten maximalen Wassertiefen und geringeren max. Fließgeschwindigkeiten; eine im Vergleich dazu glattere Parametrisierung hat den gegenteiligen Effekt. Die Ergebnisse zeigen auch, dass die verglichenen Modelle je nach Gelände und Gebietscharakteristika nicht unbedingt gleich auf eine ähnliche Änderung der Fließwiderstandsparametrisierung reagieren. Aus Sicht der Autoren erscheint es deshalb besonders wichtig, die entsprechenden Eigenheiten des verwendeten Modells zu kennen und entsprechend in der Parametrisierung der Fließwiderstände zu berücksichtigen.

Zu erwähnen ist im Hinblick auf die Parametrisierung der Fließwiderstände auch der Umstand, dass die Vergabe konstanter Rauheitsbeiwerte nach Manning- bzw. Strickler für verschiedene Landnutzungs- respektive -bedeckungseinheiten natürlich immer eine Vereinfachung von real ablaufenden Prozessen bedingt. Einerseits verändern sich die real auftretenden Fließwiderstände für verschiedene Landbedeckungseinheiten saisonal, etwa durch unterschiedliche Vegetationsperioden oder Bearbeitungsstadien auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. Andererseits können auch in Abhängigkeit der Wassertiefe (vgl. Abbildung 9) und anderer Faktoren (z.B. Auflösung des gewählten Rechennetzes in

der Modellierung) die effektiven Fließwiderstände variieren, was durch die Wahl eines konstanten Rauheitsparameters nicht abgebildet wird.

Abbildung 9: In Fließrichtung umgelegte Vegetation aufgenommen nach einem pluvialen Hochwasser 2016 in Schwertberg (links) und im Zuge eines Beregnungsversuches dokumentierter Abfluss (rechts). In Abhängigkeit der Wassertiefe sind die effektiven Fließwiderstände hier für dieselbe Vegetationseinheit höher (geringe Wassertiefe, rechts) bzw. geringer (umgelegte Vegetation in Folge einer größeren Wassertiefe, links).

Entsprechend sind in der Literatur unterschiedliche Rauheitsparameter zu finden, welche auch eine entsprechende Streuung aufweisen (siehe Abbildung 10).

Die Definition von wassertiefenabhängigen Fließwiderständen oder die Wahl alternativer Fließwiderstandsformulierungen ist in einzelnen Softwarepaketen bereits möglich; die Thematik ist allerdings sehr umfangreich und wurde im Zuge der RAINMAN Pilotstudie Oberösterreich nicht explizit untersucht.

Aus Sicht der Autoren ist für die Abschätzung der Starkregengefährdung zum aktuellen Stand eine pragmatische Wahl von Fließwiderstandsparametern zielführend.

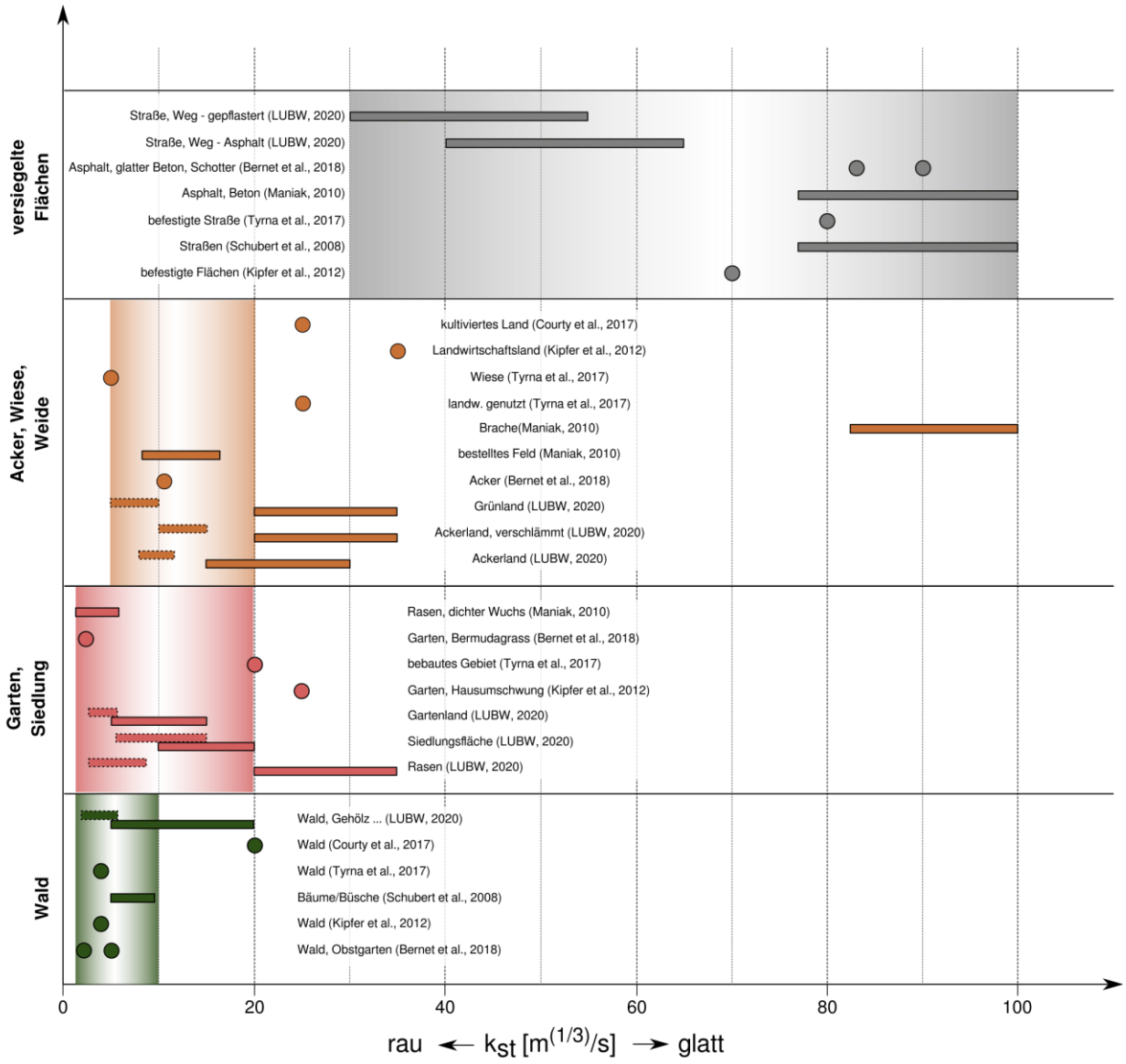

Abbildung 10: Zusammenstellung von Rauheitswerten nach Strickler aus Literaturwerten für unterschiedliche Landnutzungsklassen/-typen. Die strichliert umrandeten Wertebereiche werden in LUBW (2020) für geringe Wassertiefen („Dünnfilmabfluss“) vorgeschlagen, die entsprechenden durchgezogenen Boxen in den LUBW Referenzen beziehen sich auf Wertebereiche für Wassertiefen vom mehr als 10cm.

Entsprechend wurde im Zuge der Sensitivitätsuntersuchungen zu Rauheiten, die Nutzungsarten Acker, Wiese, Weide in einer Kategorie bei landwirtschaftlichen Flächenteilen in Absprache mit dem Auftraggeber zusammengefasst. Dieser pragmatische Ansatz wurde gewählt, da Bestandsänderungen von Ackerflächen in Grünlandflächen grundsätzlich möglich sind und die jeweiligen Flächenanteile saisonal oder auch im mehrjährigen Verlauf variieren können.

Eine entsprechende vereinfachte Festlegung von mittleren Rauheitswerten zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten ist denkbar (Achleitner et al. 2020b). Die in der Sensitivitätsstudie untersuchten Bandbreiten zur den Nutzungsarten sind in Abbildung 10 farblich hinterlegt.

7. Verlustansatz, Abflussbeiwert

Die Abflussentstehung auf unterschiedlichen Flächen ist u.a. abhängig von Faktoren wie der aktuellen Vegetationsbedeckung, dem Versiegelungsgrad, der Landnutzung und den Bodeneigenschaften. Die meisten dieser Faktoren sind zeitlich variabel; in Abhängigkeit der aktuell vorherrschenden Verhältnisse kann es bei vergleichbaren Niederschlägen zu unterschiedlich ausgeprägter Oberflächenabflussbildung kommen. Dementsprechend ist die Berücksichtigung der vertikal-hydrologischen Prozesse in der Modellierung von Oberflächenabflüssen wichtig. Entsprechende empirische und physikalisch-basierte Modellansätze unterschiedlicher Komplexität existieren, davon sind einige in den gängigen Softwarepaketen implementiert (vgl. Tabelle 1). In Modellen, in denen räumlich und zeitlich variabler Niederschlag als Randbedingung möglich sind (vgl. Tabelle 1), können unabhängig vom implementierten Verlustansatz entsprechende Berechnungen im Preprocessing durchgeführt werden; der vorab berechnete Nettoregen für unterschiedliche Zeitschritte kann dann für jedes Element des Rechennetzes/-rasters als Randbedingung definiert werden. Aus praktischer Sicht stellt sich neben der Wahl des entsprechenden Verlustmodells aber vor allem die Frage nach dessen Parametrisierung.

Ein pragmatischer Ansatz für Gefahrenhinweiskarten ist, sofern solche Datengrundlagen zur Verfügung stehen, die Verwendung entsprechender regionalmaßstäblicher Abflussbeiwertkarten oder Nettoregen-Datensätze (vgl. LUBW, 2016; Steinbrich et al. 2016; Sotier et al. 2016). Ein entsprechender Datensatz für Oberösterreich wird aktuell überarbeitet; aktuelle Informationen dazu können auf Anfrage beim Amt der Oberösterreichischen Landesregierung eingeholt werden. Aus Sicht der Autoren bilden solche Karten - nach Prüfung und ggf. Aktualisierung der zugrundeliegenden Daten an mögliche geänderte Verhältnisse – zum aktuellen Stand eine pragmatische und vergleichbare Grundlage für die Erstellung von Gefahrenhinweiskarten. Sofern für ein Untersuchungsgebiet lokal detailliertere Informationen und Anhaltspunkte zum möglichen Abflussbildungsverhalten vorliegen (z.B. aus Beregnungsversuchen, Sickerversuchen, Bodenansprache, Beobachtungen/Messungen abgelaufener Ereignisse, etc.) ist auch die Verwendung von alternativen hydrologischen Abflussbildungsmodellen (z.B. Zemokost, SCS-CN, Green-Ampt, etc.) sinnvoll (vgl. Achleitner et al., 2020b); die entsprechende Modellparametrisierung sollte dabei bestmöglich an die realen Verhältnisse und das gewählte hydrologische Modell angepasst erfolgen. Eine Vernachlässigung der hydrologischen Abflussbildungsprozesse in der Modellierung (d.h. konstanter Abflussbeiwert 1 – Nettoregen entspricht Bruttoregen) wird hier ausdrücklich nicht empfohlen.

Wie schon in den vorherigen Abschnitten angemerkt, sind auch bei der Parametrisierung des hydrologischen Verlustmodells die getroffenen Annahmen jedenfalls nachvollziehbar zu dokumentieren. Eine Abstimmung mit dem Auftraggeber hinsichtlich der getroffenen Annahmen im Vorfeld kann hier auch helfen die Nachvollziehbarkeit der Modellergebnisse zu verbessern. Unabhängig von gewähltem Verfahren und Parametrisierung sollten die berechneten Ergebnisse nach Möglichkeit plausibilisiert werden (siehe dazu auch Abschnitt 9).

8. Kartographische Darstellung der Ergebnisse

Die Anforderungen an die Darstellung der Ergebnisse richten sich nach dem jeweiligen Einsatzzweck. In Einsatzplanung/Katastrophenmanagement sind die Dynamik des Abflussereignisses und damit auch die Fragestellung welche Bereiche zu welchem Zeitpunkt nicht mehr zugänglich sind entscheidend. Für die Raumplanung sind in erster Linie Maximalwerte (Wassertiefe, Geschwindigkeit) von Bedeutung. Es ist deshalb im Vorfeld mit dem Auftraggeber abzuklären in welcher Form die Ergebnisse dargestellt werden sollen. Nachfolgend werden Darstellungsmöglichkeiten für Gefahrenhinweiskarten vorgestellt.

8.1. Darstellung maximale Wassertiefe h_{max}

Durch Starkniederschläge gefährdete Bereiche können am einfachsten an Hand von Klassen der maximalen modellierten Wassertiefen bzw. Wasserstände h_{max} ausgewiesen werden. Diese Klassifizierung ist leicht nachvollziehbar; durch eine klassifizierte Darstellung können zudem Unsicherheiten in der Modellierung zum Teil (ausgenommen Klassengrenzen) abgedeckt werden (insbesondere durch die Wahl weiterer Klassen).

Im Gegensatz zu fluvialen Überflutungen, bei denen die Hochwasseranschlaglinie aus Berechnungsergebnissen sehr genau bestimmt werden kann, ist dies bei der Modellierung pluvialer Überflutungen infolge von Starkregenereignissen nicht ohne weiteres möglich. Durch die Verwendung von flächigem Niederschlag als äußere Einwirkung in der hydrodynamischen Modellierung sind im Zuge eines Rechenlaufes nahezu alle Zellen in einem oder mehreren Zeitschritten benetzt (Wassertiefen > 0m fallen an den Zellen an). Somit kann eine Ausweisung der Hochwasseranschlagmarke über die Unterscheidung nass/trocken nicht getroffen werden. In der Praxis hat sich deshalb die Verwendung eines Grenzwertes für h_{max} etabliert, unter dem die Wassertiefen in entsprechenden Kartenprodukten nicht dargestellt werden. Die minimal dargestellte Wassertiefe bewegt sich dabei meist im Bereich zwischen 0.015m und 0.05m. Die Wahl eines entsprechenden Wertes in dieser Bandbreite wird aus Sicht der Autoren empfohlen. In Tabelle 2 ist ein Vorschlag für die Klassifizierung der maximalen Wassertiefe dargestellt, wie er in Achleitner et al., (2020b) verwendet wird.

Tabelle 2: Vorschlag für die Klassifizierung der maximalen Wassertiefe

Farbe	hex(rgba)	(r,g,b)	Kriterium h_{max}
	2cf5e3ff	(44,245,227)	$0.02\,\mathrm{m} \leq h_{max} \leq 0.1\,\mathrm{m}$
	1ebeffff	(30,190,255)	$0.1\,\mathrm{m} \leq h_{max} \leq 0.3\,\mathrm{m}$
	1b5affff	(27,90,255)	$0.3\,\mathrm{m} \leq h_{max} \leq 0.5\,\mathrm{m}$
	0600a8ff	(6,0,168)	$h_{max} > 0.5\,\mathrm{m}$

8.2. Darstellung Wassertiefe und Geschwindigkeit

Sowohl die auftretenden Wassertiefen als auch die berechneten Fließgeschwindigkeiten können für die Darstellung der Gefährdungsbereiche bei Starkniederschlägen herangezogen werden. Dabei können die beiden Parameter getrennt voneinander oder in Kombination betrachtet werden. Für eine getrennte Darstellung eignen sich eigene Karten mit separater Darstellung der beiden Parameter oder eine überlagerte Darstellung in einer Karte (z.B.: durch Kombination aus Farbe und Textur oder die punktuelle Darstellung von Fließgeschwindigkeiten an neuralgischen Punkten). Eine kombinierte Klassifizierung kann beispielsweise an Hand der Energielinienhöhe ($\mathrm{h} + \frac{\mathrm{v}^2}{2\mathrm{g}}$) oder entsprechender Matrizen erfolgen. Hierbei geht allerdings die Information über den jeweiligen Beitrag des Parameters an der Klassifizierung verloren.

In Abbildung 10 ist exemplarisch eine Darstellung klassifiziert nach der Energielinienhöhe, wie sie in der Richtlinie für Gefahrenzonenpläne der Wildbach und Lawinenverbauung (BMLFUW, 2011) für häufiger auftretende Ereignisse (HQ30) verwendet wird, dargestellt. Als unterer Grenzwert für die Ausweisung einer gelben Zone wurden 5cm verwendet, da ansonsten alle benetzten Flächen als gelbe Zone ausgewiesen werden.

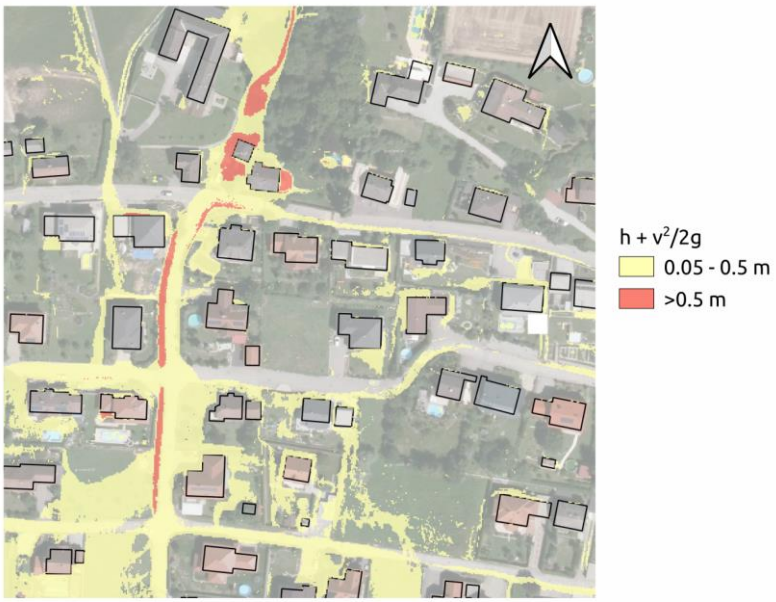

Abbildung 11: Darstellung der Gefahrenzonen angelehnt an die Klassifizierung für häufiger auftretende Ereignisse (HQ30) nach BMLFUW (2011). Als minimaler Grenzwert für die gelbe Zone wurde $(h + \frac{v^2}{2g}) \geq 5cm$ verwendet.

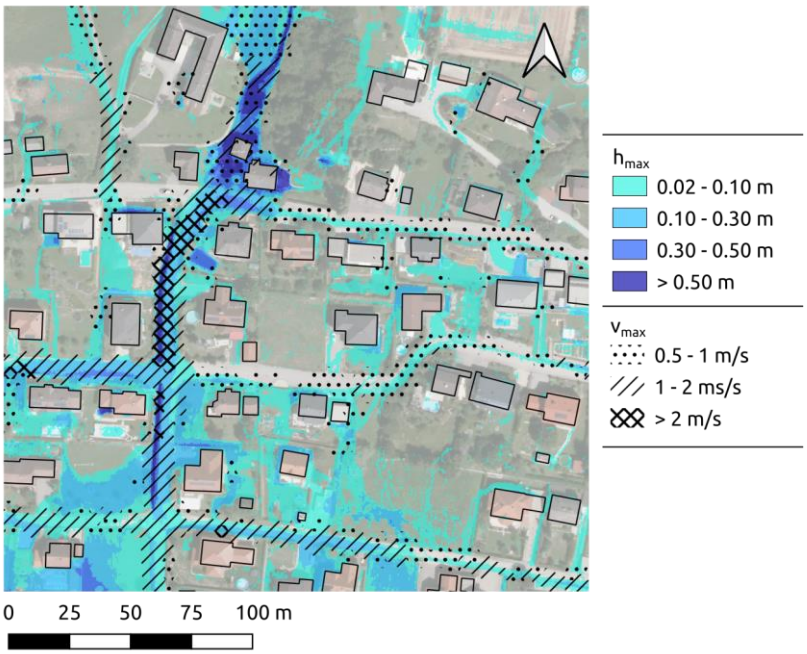

Abbildung 12: Beispiel gemeinsame Darstellung der maximalen Wassertiefen h_{max} (farbkodiert nach Tabelle 2) und der maximalen Fließgeschwindigkeit v_{max} (schraffiert überlagert).

Eine weitere Möglichkeit, Informationen über h_{max} und v_{max} gemeinsam darzustellen ist eine Überlagerung der farbkodierten Wassertiefen mit der Geschwindigkeit als Schraffur. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 12 dargestellt.

8.3. Zusammenfassung kartographische Darstellung

Insbesondere die Wahl der minimal dargestellten Wassertiefe ist für die Darstellung von durch Starkniederschlägen gefährdeten Bereichen wichtig. Die Wahl der minimal dargestellten Wassertiefen in der Bandbreite zwischen 0.015m und 0.05m wird aus Sicht der Autoren als sinnvoll erachtet. Die Abstufung und Anzahl der Klassen sollten entsprechend des Einsatzzwecks der Gefahrenhinweiskarte gewählt werden.

Wenn zusätzlich zu den maximalen Wassertiefen auch Fließgeschwindigkeiten in der Darstellung mitberücksichtigt werden sollen, kann zwischen einer separaten Darstellung (z. B. eigener Kartenlayer, punktuelle Darstellung besonders relevanter Bereiche durch Punktsignaturen/Pfeile) oder einer kombinierten Darstellung (z.B. Energielinienhöhe, matrizenbasierte Visualisierung) unterschieden werden. Je nach Anwendungsbereich der Gefahrenhinweiskarte (Einsatzplanung/Katastrophenmanagement vs. raumplanerische Verwendung) sollte hier die entsprechend geeignete Variante gewählt werden. Bei Darstellung der Fließgeschwindigkeiten wird eine Plausibilitätskontrolle der modellierten Geschwindigkeiten (insbesondere bei „automatischer“ Klassifizierung der Ergebnisse) empfohlen, um gegebenenfalls Artefakte in den Modellrechnungen zu erkennen.

Für eine einheitliche Grundlage zur Beurteilung von Gefährdungssituationen wären Standards auf Bundesebene für bewertende Darstellungen (rote/gelbe Zonen) im Sinne einer Gefahrenzonenplanung hilfreich. Für das betrachtete Beispiel wäre der WLV HQ30-Ansatz (vgl. Abbildung 11) aus Sicht der Autoren beispielsweise ein guter Kompromiss zwischen den Österreichischen BWV/WLV-fluvialen Bewertungsmethoden und den LUBW-Starkregenbewertungsmethoden (Details siehe Achleitner et al., 2020b).

9. Plausibilitätskontrolle

Für die zweidimensionale hydrodynamische Modellierung von Oberflächenabfluss infolge von Starkniederschlägen gibt es mittlerweile eine wachsende Anzahl an verfügbaren Softwareprodukten mit unterschiedlichen Modellansätzen und implementierten Funktionen. Die Qualität und Aussagekraft der Modellergebnisse wird dabei von den zugrundeliegenden Daten, getroffenen Annahmen und verwendeten Berechnungsansätzen beeinflusst. Im Rahmen der RAINMAN Pilotstudie Oberösterreich konnte gezeigt werden, dass bei Verwendung unterschiedlicher Modelle mitunter beträchtliche Differenzen in den Ergebnissen auftreten können, auch bei gleicher Parameterwahl in den Modellen. Abschließend soll hier nochmals darauf hingewiesen werden, dass eine Plausibilitätsprüfung der Simulationsergebnisse in jedem Fall empfohlen wird. Nachfolgend werden hierfür einige Möglichkeiten aufgeführt:

- Eine Überprüfung von Überflutungsflächen und Fließwegen kann anhand von Begehungen mit lokalen Experten erfolgen. Feuerwehren liefern oft sehr hilfreiche Informationen in Form von Einsatzdokumentationen. Anhand dieser Aufzeichnungen können Fließwege und betroffene Gebäude identifiziert werden, im Idealfall auch maximale Wasserstände abgeleitet werden. Im Zuge einer Begehung sollten auch betroffene Anwohner miteinbezogen werden. Diese können wertvolle Informationen zu Wassereintrittspunkten und Wasserständen in Gebäuden liefern. Kürzlich aufgetretene Ereignisse sind häufig anhand von Anschlagmarken an Gebäuden/Vegetation sichtbar und können mit relativ geringem Aufwand aufgenommen werden. Die Anschlagsmarken können Aufschluss über die Größenordnungen maximal aufgetretener Wassertiefen geben und dazu verwendet werden die Modellergebnisse in Hinblick darauf zu überprüfen.
- Es wird eine räumliche und zeitliche Überprüfung der berechneten Maximalwerte empfohlen. Treten lokal sehr große Abweichungen zu benachbarten Elementen/Zellen auf sollte der zeitliche Verlauf anhand von Kontrollpunkten/Kontrollquerschnitten überprüft werden. Stark fluktuierende Wassertiefen (z.B. sog. „Roll-wave“ instabilities) oder Geschwindigkeiten mit extremen Spitzen sind ein Indiz für ein numerisches Problem des verwendeten Modellansatzes. Hier kann beispielweise überprüft werden, ob Gütekriterien wie das CFL-Kriterium eingehalten werden. In weiterer Folge können gegebenenfalls die Modellparameter bzw. das Berechnungsnetz/Raster angepasst werden.
- Neben den berechneten Maximalwerten für Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen, sollte auch deren zeitlicher Verlauf über den simulierten Zeitraum auf mögliche Unregelmäßigkeiten hin untersucht werden. Dies kann z.B. in einem ersten Schritt anhand der visuellen Betrachtung von verschiedenen Zeitschritten erfolgen (z.B. durch Animation verschiedener Zeitschritte). Auch die Überprüfung von zeitlichen Verläufen von Abflusshöhe h, Fließgeschwindigkeit v und ggf. Abfluss Q an definierten Kontrollpunkten bzw. -querschnitten kann dem Modellierer helfen, die Plausibilität der Modellergebnisse besser einzuschätzen.
- Die gewählten Modellrauheiten können näherungsweise anhand des zeitlichen Ablaufes der Hochwasserwelle überprüft werden. Ein wesentliches Merkmal von Oberflächenabfluss ist, dass dieser zeitnah mit Starkniederschlägen auftritt. Treten im Siedlungsbereich im Modell entsprechende Wassertiefen beispielsweise erst mehr als eine Stunde nach Regenende auf, so kann dies ein Indiz sein, dass das Modell zu rau parametrisiert wurde. Informationen zum zeitlichen Verlauf von Ereignissen können auch im Rahmen der Begehung anhand von Einsatzaufzeichnungen bzw. Fotos mit Zeitstempel gewonnen werden (vgl. z.B. Achleitner et al. 2020; Lumassegger, 2016a, b; Starl, 2020).

10. Verwendete Literatur

Achleitner, S., Kohl, B., Lumassegger, S., Huber, A., Formayer, H. und Weingraber, F. (2020a), Sturzfluten, In Thomas Glade, Martin Mergili, Katrin Sattler (Hrsg.) ExtremA 2019. Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich. Vienna University Press, S. 247–286, ISBN Print: 9783847110927 – ISBN E-Lib: 9783737010924

Achleitner, S.; Huber, A.; Lumassegger, S.; Spira, Y.; Weingraber, F. (2020b): Pilotstudie Oberösterreich -- Methoden zur Risikogebietsausweisung für Starkregen, Technischer Bericht RAINMAN Interreg Central Europe

Becker, A. (2019). Extremerer Niederschlag im Klimawandel - Was wissen wir? WasserWirtschaft, 12:10–16.

Berg, P.; Moseley, C.; Haerter, J. (2013). Strong increase in convective precipitation in response to high temperatures. Nature Geoscience, 6:181–185. URL https://doi.org/10.1038/ngeo1731.

Bernet, D. B.; Prasuhn, V.; Weingartner, R. (2017). Surface water floods in Switzerland: what insurance claim records tell us about the damage in space and time. Natural Hazards and Earth System Sciences, 17:1659–1682.

Bernet, D. B.; Zischg, A.; Prasuhn, V.; Weingartner, R. (2018). Modeling the extent of surface water floods in rural areas: Lessons learned from the application of various uncalibrated models. Environmental Modelling & Software, 109:134–151.

BMLFUW (2011). die.wildbach - Richtlinie für die Gefahrenzonenplanung BMLFUW-LE.3.3.3/0185-IV/5/2007 Fassung vom 04. Februar 2011. techn. Richtlinie, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW).

Broich, K.; Kaiser, M.; Lin, Q.; Mitterer, J.; Nguyen, H.; Pflugbeil, T.; von Trentini, F.; Willkofer, F.; Disse, M.; Ludwig, R. (2018). Das Projekt HiOS - Erstellung einer Hinweiskarte für Oberflächenabfluss und Sturzfluten für bayerische Gemeinden. In: Disse, M.; Kaiser, M. (Hg.), Starkregen und Sturzfluten - Erfassen, Erforschen, Evaluieren; Beiträge zum Seminar am 6. Juni 2018, Nummer 40.18 in Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, S. 27–40. doi:10.14617/for.hydrol.wasbew.40.18.

Courty, L. G.; Pedrozo-Acuña, A.; Bates, P. D. (2017). Itzı¤ (version 17.1): an open-source, distributed GIS model for dynamic flood simulation. Geoscientific Model Development, 10:1835–1847.

Falconer, R.; Cobby, D.; Smyth, P.; Astle, G.; Dent, J.; Golding, B. (2009). Pluvial flooding: new approaches in flood warning, mapping and risk management. Journal of Flood Risk Management, 2,(2):198–208.

Formayer, H.; Kromp-Kolb, H. (2009). Hochwasser und Klimawandel. Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasserereignisse in Österreich. BOKU-Met Report 7, Institut für Meteorologie (BOKU-Met), Department für Wasser - Atmosphäre - Umwelt, Universität für Bodenkultur Wien, Wien. Endbericht WWF (2006), URL http://www.boku.ac.at/met/report/BOKU-Met_Report_07_online.pdfHiO.

Formayer, H. and A. Fritz (2017). "Temperature dependency of hourly precipitation intensities – surface versus cloud layer temperature." International Journal of Climatology 37(1): 1-10.

Fritsch, K.; Assmann, A.; Tyrna, B. (2016). Long-term experiences with pluvial flood risk management. FLOODrisk 2016 – 3rd European Conference on Flood Risk Management, DOI:10.1051/e3sconf/20160704017

Giorgi, F.; Raffaele, F.; Coppola, E. (2019). The response of precipitation characteristics to global warming from climate projections. Earth System Dynamics, 10:73–89. URL https://doi.org/10.5194/esd-10-73-2019.

Humer, G.; Reithofer, A.; Klar, R.; Achleitner, S. (2015): Erweiterung eines 2D-Strömungsmodelles zur Berechnung von Sturzfluten – Plausibilisierung und praktische Anwendung für die Darstellung von

Gefahrenkarten und Lösung von Planungsaufgaben in Siedlungsgebieten, KW - Korrespondenz Wasserwirtschaft 8/3, S. 164 - 171, DOI: http://dx.doi.org/10.3243/kwe2015.03.002;

Kipfer, A.; Berger, C.; Mani, P.; Hulliger, R.; Caduff, U.; Dobmann, J.; Gsteiger, P.; Pauli, M.; Schneider, M. (2018). Gefährdungskarte Oberflächenabfluss Schweiz. Technischer Bericht, geo7, Bern, Switzerland.

Kipfer, A.; Kienholz, C.; Liener, S. (2012). Ein neuer Ansatz zur Modellierung von Oberflächenabfluss. In: 12th Congress INTERPRAEVENT 2012, Grenoble/France, Conference Proceedings, S. 179–189.

Kohl, B. (2011). Das Niederschlags-Abflussmodell ZEMOKOST. Entwicklung eines praktikablen Modells zur Ermittlung von Hochwasserabflüssen in Wildbacheinzugsgebieten unter Einbeziehung verbesserter Felddaten. PhD Thesis, Universität Innsbruck.

LUBW (2016). Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. Leitfaden, LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg.

LUBW (2020). Anhänge 1 a,b,c zum Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. Stand März 2020. LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (www.lubw.baden-wuerttemberg.de/wasser/starkregen)

Lumassegger, S.; Achleitner, S.; Klar, R.; Kohl, B. (2016a): Flash flood formation in pre-alpine landscape – Impact of the spatial distribution of storm event. In: Koboltschnig, Gernot (Ed.): 13th Congress INTERPRAEVENT 2016, 30 May to 2 June 2016, Lucerne, Switzerland - Extended Abstracts. Klagenfurt: Internati-onale Forschungsgesellschaft Interpraevent / International Research Society Interpraevent, S. 128 --129.

Lumassegger, S.; Achleitner, S.; Kohl, B.; Formayer, H.; Strehz, A.; Einfalt, T. (2016b): Auswirkungen räumlich variabler Niederschläge auf die Sturzflutsimulation. In: Casper, Markus; Gronz, Oliver (Hg.): Räumliche Heterogenität - Erkennen, Abbilden, Validieren oder Ignorieren? Beiträge zum 4. Trierer Workshop zur Niederschlag-Abfluss-Modellierung am 5./6. Oktober 2015 in Trier. Hennef: FgHW - Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 36.16, ISBN 978-3-88721-341-1, S. 131 - 139. (DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.36.)

Maniak, U. (2010). Hydrologie und Wasserwirtschaft - Eine Einführung für Ingenieure. Springer. doi:DOI10.1007/978-3-642-05396-2.

Neelz, S.-and G.,Pender (2013): Benchmarking the latest generation of 2D hydraulic modelling packages, Report – SC120002. Environment Agency, Bristol, ISBN: 978-1-84911-306-9

Nissen, K. M.; Ulbrich, U. (2017). Increasing frequencies and changing characteristics of heavy precipitation events threatening infrastructure in Europe under climate change. Natural Hazards and Earth System Sciences, (17):1177–1190.

Schubert, J. E.; Sanders, B. F. (2012). Building treatments for urban flood inundation models and implications for predictive skill and modelling efficiency. Advances in Water Resources, 41:49–64.

Schubert, J. E.; Sanders, B. F.; Smith, M. J.; Wright, N. G. (2008). Unstructured mesh generation and landcover-based resistance for hydrodynamic modeling of urban flooding. Advances in Water Resources, 31:1603–1621.

Starl, H. (2020). Hangwassermodellierungen und deren Möglichkeiten zur Abschätzung von potentiellen Gefährdungen für Gebäude – Eine Analyse anhand von Starkregenereignissen in Oberösterreich. Bautechnik 97, H. 4, S. 255-267. https://doi.org/10.1002/bate.201900028

Steinbrich A., Leistert H., Weiler M. (2016): Model-based quantification of runoff generation processes at high spatial and temporal resolution. Environmental Earth Sciences (2016) 75:1423. doi:10.1007/s12665-016-6234-9

Strehz, A.; Einfalt, T.; Achleitner, S.; Lumassegger, S. (2015): Analysis of small scale convective precipitation events in Austria. In: 10th International Workshop on Precipitation in Urban Areas, Rainfall in Urban and Natural Systems. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule (ETH)

Tyrna, B.; Assmann, A.; Fritsch, K.; Johann, G. (2017). Large-scale high-resolution pluvial flood hazard mapping using the raster-based hydrodynamic two-dimensional model FloodAreaHPC. Journal of Flood Risk Management. DOI: 10.1111/jfr3.12287.

Weilguni, V. (2019). Vom Messwert zum Bemessungsniederschlag – ein Service der Hydrographie Österreichs. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 71:36-42

Zahnt, N.; Eder, M.; Habersack, H. (2018). Herausforderungen durch pluviale Überflutungen - Grundlagen, Schäden und Lösungsansätze. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 70:64–77

RAINMAN Key Facts

Project duration:	07.2017 – 06.2020
Project budget:	3,045,287 €
ERDF funding:	2,488,510 €
RAINMAN website & newsletter registration:	**www.interreg-central.eu/rainman**

Interreg CENTRAL EUROPE
RAINMAN
European Union
European Regional Development Fund

Lead Partner

LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE | Freistaat SACHSEN

Saxon State Office for Environment, Agriculture and Geology
rainman.lfulg@smul.sachsen.de

Project Partner

Saxon State Ministry of the Interior
STAATSMINISTERIUM DES INNERN | Freistaat SACHSEN

Environment Agency Austria
umweltbundesamt

Office of the Styrian Government
Das Land Steiermark
Wasserwirtschaft

T. G. Masaryk Water Research Institute, p.r.i
VÚV TGM

Region of South Bohemia
The Region of South Bohemia

Croatian Waters
HRVATSKE VODE

Middle Tisza District Water Directorate

Institute of Meteorology and Water Management National Research Institute
IMGW

Leibniz Institute of Ecological Urban and Regional Development
Leibniz Institute of Ecological Urban and Regional Development

Project support

INFRASTRUKTUR & UMWELT
Professor Böhm und Partner

INFRASTRUKTUR & UMWELT
Professor Böhm und Partner
RAINMAN@iu-info.de